

Technologiebericht

1.7 Umweltwärme

innerhalb des Forschungsprojekts

TF_Energiewende

Sebastian Herkel

Dr. Marek Miara

Dr. Peter Schossig

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Disclaimer:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036A-C durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren und Autorinnen.

Bitte den Bericht folgendermaßen zitieren:

Herkel, S.; Miara, M.; Schossig, P. (2018): Technologiebericht 1.7 Umweltwärme. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hinweis:

Die multi-kriterielle Bewertung und generell die Erstellung dieses Berichts basiert auf den Vorgaben, die in Teilbericht 1 beschrieben sind:

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 (Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES: Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Kontakt:

Sebastian Herkel

Tel.: +49 761 / 4588 – 5117

Fax: +49 761 / 4588 – 9117

E-Mail: sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme

Heidenhofstr. 2

79110 Freiburg

Review durch:

Bernd Krautkremer (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung (Steckbrief)	8
1 Beschreibung des Technologiefeldes	10
1.1 Wärmequellen und -senken: Umweltwärme	10
1.1.1 Luft	10
1.1.2 Oberflächennahe Geothermie	10
1.1.3 Abwärmenutzung	11
1.2 Wärmepumpen	11
1.3 Kälteerzeugung	12
1.4 Systemintegration	13
2 Stand F&E in Deutschland	15
2.1 Entwicklungs- und Forschungsschwerpunkte	15
2.2 Erschließung von Umweltwärme	15
2.3 Wärmepumpen und Kältemaschinen	16
2.4 Systemintegration, Qualitätssicherung und Low-Ex-Systeme	16
3 Relevanz öffentlicher Förderung	17
3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten	17
3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)	18
4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes	22
4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale	22
4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen	28
4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz	31
4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz	32
4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung	33
4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich	33
4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz	36
4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit	37
4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen	38
4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität	39
5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand	40
5.1 F&E-Empfehlung Erschließung Umweltquellen	40
5.2 F&E-Empfehlung Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen	41
5.3 F&E-Empfehlung Sorptionswärmepumpen und -kältemaschinen	42
5.4 F&E-Empfehlung Systemintegration	42
Literaturverzeichnis	44

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

B.A.U.	Business-as-usual
BHKW	Blockheizkraftwerk
WP	Wärmepumpe
JAZ	Jahresarbeitszahl
COP	Coefficient of Performance

Einheiten und Symbole


%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1	Techno-ökonomische Kenndaten von Kompressionswärmepumpen -----	12
Tab. 1-2	Techno-ökonomische Kenndaten von Sorptionswärmepumpen -----	12
Tab. 1-3	Verfahren zur Kälteerzeugung-----	13
Tab. 2-1	Öffentliche F&E-Projekte in Deutschland für Umweltenergienutzung von 1970-2019-----	15
Tab. 3-1	Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Technologiefeld Umweltenergie-----	17
Tab. 3-2	Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Umweltwärme-----	18
Tab. 3-3	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologieerschließung Umweltwärme-----	19
Tab. 3-4	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologie Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen-----	20
Tab. 3-5	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologie Sorptionssysteme-----	20
Tab. 3-6	Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologie Systemintegration-----	21
Tab. 4-1	Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionswärmepumpen (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	23
Tab. 4-2	Analyse des globalen Marktpotenzials für die Technologie Wärmepumpen (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)-----	23
Tab. 4-3	Bandbreite des internationalen globalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionskältemaschinen (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	24
Tab. 4-4	Analyse des globalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionskälte (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)-----	24
Tab. 4-5	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionswärmepumpe (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	25
Tab. 4-6	Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionswärmepumpe (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)-----	25
Tab. 4-7	Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionskältemaschine (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)-----	26
Tab. 4-8	Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionskälte (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)-----	26
Tab. 4-9	Hochrechnung des internationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionswärme und -kälte (Kosten neu installierte Leistung im Bezugsjahr einschl. Ersatzinstallation in Preisen 2015)-----	27
Tab. 4-10	Hochrechnung des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionswärmepumpe (Kosten neu installierte Leistung im Bezugsjahr einschl. Ersatzinstallation in Preisen 2015)-----	27
Tab. 4-11	Wachstumsraten der Technologie Wärmepumpe der unterschiedlichen globalen und nationalen Szenarien als CAGR dargestellt-----	28
Tab. 4-12	Wachstumsraten der Technologie Kompressionskälte der unterschiedlichen globalen und nationalen Szenarien als CAGR dargestellt -----	28

Tab. 4-13	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen weltweit im Vergleich zum Referenzfall 6 °C bzw. zum 2 °C-Szenario.-----	29
Tab. 4-14	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung von Umweltwärme durch Kompressionswärmepumpen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall -----	29
Tab. 4-15	Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung von Umweltwärme mittels Kältemaschinen weltweit im Vergleich zum Referenzfall 6 °C-Szenario (nur Einsparungen durch Änderung des Strom-Mixes).-----	30
Tab. 4-16	Fluorierte Kohlenwasserstoffe, die jährlich durch F&E und Umstellung auf andere Kältemittel in der Technologie Kompressionswärmepumpen und Kältemaschinen vermieden werden -----	31
Tab. 4-17	Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld Umweltwärme -----	31
Tab. 4-18	Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz (nicht-erneuerbarer Anteil) durch Einsatz von Wärmepumpen in Deutschland im Vergleich zur Referenz fossile Kessel-----	32
Tab. 4-19	Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale durch Technologie Kompressionswärmepumpen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr; für alle installierten Anlagen im Jahr) -----	33
Tab. 4-20	Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Umweltenergienutzung-----	34
Tab. 4-21	Öffentliche F&E-Förderung in Deutschland für Umweltenergienutzung von 1970-2019-----	35
Tab. 4-22	Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Umweltenergie – Input-Orientierung -----	36
Tab. 4-23	Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologien zur Erschließung Umweltquellen-----	37
Tab. 4-24	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologie oberflächennahe Geothermie -----	37
Tab. 4-25	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologie Kompressionswärmepumpen -----	38
Tab. 4-26	Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologie Sorptionswärmepumpen-----	38
Tab. 4-27	Abhängigkeit von Infrastrukturen-----	38

Zusammenfassung (Steckbrief)

Technologiefeld Nr. 1.7 Umweltwärme			 Fraunhofer ISE				
A) Beschreibung des Technologiefeldes und F&E-Bedarf							
Beschreibung des Technologiefeldes							
Umweltwärme bestehend aus 4 Technologien: – Technologie T1: Oberflächennahe Geothermie und Erschließung von Luft – Technologie T2: elektrische Wärmepumpen und Kälteerzeuger mit Komponenten Kältemittelkreis, Verdichter – Technologie T3: Gas-Sorptionswärmepumpen – Technologie T4: Systemintegration							
TRL-Level: Oberflächennahe Geothermie TRL 8-9, elektrische Kompressionswärmepumpen TRL 5-9; Sorptionswärmepumpen TRL 3-9; Systemintegration TRL 5-9							
Kritische Komponenten und Systeme: Kältemittelkreis, Systemintegration, Umweltquellen							
Entwicklungsziele							
– Technologie T1: Neue Wärmeträgermittel, mitteltiefe Sonden, Reduktion der Lärmemissionen – Technologie T2: Umstellung auf Kältemittel mit geringem GWP, verringerte Geräuschentwicklung – Technologie T3: Verbesserung JAZ von 1,4 auf 1,6 bis 2025, Verringerung der Systemkosten – Technologie T4: Steigerung der Systemeffizienz auf eine JAZ > 4, Integration in das Energiesystem							
Technologie-Entwicklung							
		Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
EI. WP	Jahresarbeitszahl	-	3-5	3-5	3,5-5,5	3,5-5,5	7
	Installierte Geräte	Mio. Anschlüsse	0,75	1,25-6.5	2,3-7,9	4,6-9,5	12,9
	Anteil FKW/HFKW mit hohem Global Warming Potenzial	-	>90 %		10 %		0 %
	Investition	€/kW	500-1.100	400-800	300-600	250-400	600
Gas-WP	Jahresarbeitszahl	-	1,4-1,6		1,7-1,8		160
	Installierte Geräte	Mio. Anschlüsse	<0,01	<0,01	1,0	3,6	3,3
	Investition	€/kW	2.080	1.800	1.400	1.050	800
Quellen: Eigene Darstellung, Palzer (2016), Emerson (2015), BWP (2015), IER (2014)							
F&E-Bedarf							
– Anpassung Komponenten an andere Kältemittel bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz – Optimierung Komponenten für verbesserte Akustik – Entwicklung hybrider Systeme mit verschiedenen Energieträgern, um Fuel-Switch zu ermöglichen – Demonstrationsvorhaben für Wärmepumpen großer Leistungsklasse, Integration in Wärmenetze – Systemintegration in übergeordnete Versorgungssysteme mit fluktuierenden Erzeugern (DSM-Fähigkeit)							

B) Multikriterielle Bewertung
Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionsminderungszielen
<ul style="list-style-type: none"> – Zentraler Beitrag zur Energiewende im Wärmesektor (17-27 Mio. t/a CO₂-äq 2030; 25-55 Mio. t/a CO₂-äq in 2050 Einsparung im Vergleich zu heutigem Wärmeerzeugermix) – Aktuelle Kältemittel sind für rund 2/3 der unter die F-Gas fallenden Emissionen verantwortlich.
Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz
– Gegenüber Referenztechnologie hohe Einsparung von Primärenergie (190-270 PJ/a in 2030, 540-570 PJ/a in 2050)
Kosteneffizienz
<ul style="list-style-type: none"> – Technologie Kompressionswärmepumpe nur noch geringe Kostensenkung möglich – Technologie Sorptionswärmepumpe hohes Kostensenkungspotenzial (Treiber: größere Produktion)
Inländische Wertschöpfung
<ul style="list-style-type: none"> – Marktanteil Kompressionswärmepumpen von 80-90 % in Deutschland und 15 % in Europa – hohe lokale Wertschöpfung (30-50 % Handwerksleistungen) – Inländische Wertschöpfung ansteigend von rund 1,0 Mrd. € auf 3,8 Mrd. €/a in 2030 – bei Kälteerzeugung Dominanz asiatischer Hersteller
Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich
<ul style="list-style-type: none"> – Bzgl. Technologie Kompressionswärmepumpe und Sorptionswärmepumpe wettbewerbsfähig, dort auch hoher Anteil der wiss. Publikationen und der Patente aus Deutschland, bei direktverdampfenden Systemen Japan, Korea, China führend, Kältemittel wichtiger Trend – Trend bzgl. Technologie oberflächennahe Geothermie noch nicht absehbar
Gesellschaftliche Akzeptanz
<ul style="list-style-type: none"> – Risiko bei der Marktakzeptanz in Abhängigkeit der Differenz zwischen Strom und Gaspreis – Geringes Risiko für sozialpol. Akzeptanz – Hohes Risiko bei lokaler Akzeptanz (Erdsonden), da Umweltrisiken bestehen (Grundwasser) – Hohes Risiko der Akzeptanz aufgrund der Akustik im verdichteten Bestand
Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit
<ul style="list-style-type: none"> – Bzgl. elektrischer Wärmepumpen hohe Pfadabhängigkeit in Bezug auf Erneuerbaren Strom – Bei Gaswärmepumpen geringe Abhängigkeit
Abhängigkeit von Infrastrukturen
– Für elektrische Wärmepumpen müssen bestehende Infrastrukturen ausgebaut werden, insbesondere Wind- und PV-Kapazitäten sowie Stromnetze.
Systemkompatibilität
– Bei einem großen Bestand (hohe Durchdringung) an Wärmepumpen sind insbesondere Rückwirkungen auf das Stromnetz zu erwarten.

1 Beschreibung des Technologiefeldes

Das Technologiefeld Umweltwärme lässt sich in drei Systemebenen gliedern: Wärmesenken und -quellen, Energiewandler (Wärmepumpen und Kältemaschinen) sowie deren systemische Integration. Technologien zur Erschließung von Umweltwärme werden als Technologie T1, auf Kompression eines Kältemittels beruhende Wärmepumpen und -kältemaschinen als Technologie T2, auf Sorptionsprozessen beruhende Wärmepumpen und -kältemaschinen als Technologie T3 und technologische Aspekte der Systemintegration als Technologie T4 bezeichnet.

1.1 Wärmequellen und -senken: Umweltwärme

Unter Umweltwärme wird Wärme bzw. Kälte bezeichnet, die frei zur Verfügung steht und durch direkte Nutzung oder mittels Wärmetransformation zur Versorgung von Gebäuden oder industriellen Prozessen nutzbar gemacht wird. In diesem Kontext werden neben den natürlichen Wärmequellen Erdreich (oberflächennahe Geothermie, Tiefengeothermie), Gewässer und Luft auch die Abwärme aus Abwasser oder industriellen Prozessen als Umweltwärme bezeichnet. Im Folgenden werden die wichtigsten Methoden und Technologien zur Erschließung der Quellen beschrieben.

Die Tiefengeothermie wird gesondert in *Technologiefeld 1.2* behandelt.

1.1.1 Luft

Luft ist eine relativ leicht und kostengünstig erschließbare Wärme- und Kältequelle mit einem fast unendlichen Potenzial. Sie ist charakterisiert durch ihren stark saisonal ausgeprägten Temperaturverlauf, der zu etwas geringeren Carnot-Wirkungsgraden bei Nutzung mittels Wärmepumpen im Vergleich zu Quellen mit konstanten Temperaturen über das Jahr hinweg gesehen führt. Aufgrund der niedrigen Energiedichte müssen relativ große Volumenströme über Ventilatoren oder Rückkühlwerke gefördert werden, was zum einen den Hilfsenergieaufwand erhöht, zum anderen bei Aufstellung im Freien zu akustischen Beeinträchtigungen der Umgebung führen kann. Die Leistungsklassen der Außenlufteinheiten liegen in der Größe von wenigen kW bei Heizwärmepumpen bis zu einigen MW bei Rückkühlwerken. Letztere werden unterschieden zwischen trockenen und nassen Rückkühlwerken, bei letzteren wird noch die Verdunstungskälte von versprühtem Wasser genutzt. Zur energetischen Nutzung von Luft zählt auch die direkte Kühlung von Gebäuden mittels Nachtlüftung.

1.1.2 Oberflächennahe Geothermie

Die Temperaturen der oberflächennahen Geothermie folgen dem Jahresverlauf der Bodentemperatur, allerdings mit zunehmender Tiefe deutlich gedämpft und zeitlich verzögert. Ab einer Tiefe von ~3 m sind die Temperaturen saisonal relativ konstant und liegen 1-3 K über der mittleren Jahrestemperatur des Standortes. Die Erschließung von oberflächennaher Geothermie erfolgt im Wesentlichen durch die drei Bauformen Erdsonden mit einer Tiefe von in der Regel bis zu 100 m, durch Erdkollektoren mit einer Verlegung in einer Tiefe von rund 1,5 m sowie Saug- und Schluckbrunnen. Weitere Bauformen sind die sogenannte Kalte Fernwärme, bei der z. B. Wärme aus einem Saug-Schluckbrunnen über eine Ringleitung verteilt wird oder die

Nutzung von Wärme aus stehenden oder fließenden Gewässern mittels Wärmetauscher erfolgt.

1.1.3 Abwärmenutzung

Die dritte wesentliche Wärmequelle ist Abwärme aus anthropogenen Quellen. Dazu gehören die Nutzung von Abwasser, Abwärme aus Fertigungsprozessen und Lüftungsabwärme, die mittels Wärmerückgewinnung dem Gebäude wieder zugeführt wird. Die Leistungsfähigkeit dieser Quellen ist durch die zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus, die Größe und Qualität der Wärmetauscher sowie durch die dauerhafte und kontinuierliche Verfügbarkeit dieser Quellen bestimmt.

1.2 Wärmepumpen

Da in der Regel die zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus nicht zur Versorgungsaufgabe Raumwärme, Wärme zur Warmwasserbereitung und Prozesswärme passen, liegt die technologische Herausforderung bei der Nutzung von Umweltwärme in der Erschließung der Quellen durch Wärmetransformation, in der Regel durch eine Wärmepumpe.

Wärmepumpen sind eine seit vielen Jahrzehnten bekannte Technologie zur Wärmeversorgung, bei der in einem thermodynamischen Kreislaufprozess Umgebungswärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf typischerweise 30 bis 70 °C (bei Raumwärme), 65 °C (Trinkwasser) oder >90 °C (Prozesswärme) gehoben wird. Als Umweltquellen werden vor allem das Erdreich (Sole/Wasser-Wärmepumpen) und die Außenluft (Luft/Wasser-Wärmepumpen) verwendet.

Technologisch werden bei elektrisch oder motorisch angetriebenen Wärmepumpen im kleinen Leistungsbereich in der Regel Scroll-Verdichter sowie regelbare elektronische Expansionsventile verwendet. Bei größeren Wärmepumpen werden auch Hubkolbenverdichter und Turboverdichter eingesetzt. Als Kältemittel werden R134a für Brauchwasserwärmepumpen und vielfach noch R407c eingesetzt. Aktuell setzen sich R410a und R32 als Kältemittel bei Neuanlagen durch sowie weitere Gemische. R717 wird bei großen WP bereits länger eingesetzt. Für die weitere Zukunft sind natürliche Kältemittel mit noch geringerem GWP eine Option.

Bei thermisch oder direkt brennstoffbefeueten Wärmepumpen kommen üblicherweise Sorptionsprozesse zum Einsatz, ähnlich den Prozessen zur thermischen Kälteerzeugung. Unterschieden wird hier zwischen Feststoffsorption (Adsorption) und Flüssigsorption (Absorption). Beide Technologien mit ihren unterschiedlichen Charakteristika finden sich in auf dem Markt befindlichen Produkten sowie in der Entwicklung.

Tab. 1-1 Techno-ökonomische Kenndaten von Kompressionswärmepumpen

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Jahresarbeitszahl	-	3-5	3-5	3,5-5,5	3,5-5,5	3,5-6
Installierte Geräte	Mio. Anschlüsse	0,75	1,25-6.5	2,3-7,9	4,6-9,5	6,2-12,0
Anteil FKW/HFKW mit hohem Global Warming Potenzial	%	>90		10		0
Investition	€/kW	500-1.100	400-800	300-600	250-400	200-250

Quelle: Eigene Darstellung, Palzer (2016), Ferrari (2015), BWP (2015), IER (2014)

Die Szenarien für die Entwicklung der installierten Wärmepumpenheizgeräte variieren je nach Szenario sehr stark. Von den rund 25 Mio. Wärmerzeugern in Deutschland sind derzeit 750 Tsd. elektrische Wärmepumpen. Ihr Anteil wird bis 2050 auf 25-50 % ansteigen, einzelne Szenarien sehen sogar einen noch höheren Anteil.

Die in Tab. 1-1 dargestellten Kosten beziehen sich auf die Kosten der Wärmepumpen im kleinen Leistungsbereich bis 12 kW ohne Installationskosten im deutschen Markt. Die Kosten für diese Geräteklasse liegen bereits heute in den Niederlanden und Italien bei 500-600 EUR/kW. Für größere Leistungsklassen liegen die Kosten bei rund 200 EUR/kWp und sind damit vergleichbar mit den Kosten von großen Kompressionskältemaschinen (IER 2014).

Tab. 1-2 Techno-ökonomische Kenndaten von Sorptionswärmepumpen

	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Jahresarbeitszahl	-	1,4-1,6		1,7-1,8		2,0
Installierte Geräte	Mio. Anschlüsse	<0,01	<0,01	1,0	3,6	3,3
Investition	€/kW	2.080	1.800	1.400	1.050	800

Quelle: Eigene Darstellung, Palzer (2016)

Die Anzahl der installierten Sorptionswärmepumpen ist bisher sehr gering, daher sind die Anteile der Sorptionswärmepumpen auf Basis der techno-ökonomischen Studie angegeben, die diese Technologie berücksichtigt (Palzer 2016). Die Investitionskosten und deren Entwicklung wurden auf Basis von Experteninterviews ermittelt (Tab. 1-2).

1.3 Kälteerzeugung

Kälteerzeugung lässt sich grundsätzlich durch ihre Anwendung und das Temperaturniveau in zwei Kategorien unterteilen: *Klimakälte* und *Prozesskälte*. Während Prozesskälte in der Industrie zur Produktion oder Konservierung verderblicher Waren eingesetzt wird, dient Klimakälte fast ausschließlich der Erhöhung des menschlichen Komforts in einem Gebäude. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Bereitstellung von Kälte für IT- und Kommunikationsinfrastrukturen.

In der Gebäudeklimatisierung können natürliche Kältequellen wie die Nachtluft und das Erdreich genutzt werden. (Klima-)Kälte muss deshalb zwingend im Zusammenhang mit der Kälteerzeugung, der Kältespeicherung, dem Kältetransport und der Erschließung natürlicher Kältequellen gesehen werden. Die Kälteerzeugung lässt sich nach der aufgewendeten Energie unterteilen in elektrische Kälteerzeuger und thermische Kälteerzeuger. Zu den elektrischen Kälteerzeugern werden hier ebenfalls Methoden gezählt, die in der Realität durch elektrischen Strom gespeist werden, aber physikalisch betrachtet auf anderen (z. B. mechanischen oder magnetischen) Effekten beruhen. Bei der thermischen Kälteerzeugung wird Wärme genutzt, um Kälte zu erzeugen. Die gängigsten Wärmequellen sind Abwärme, KWK, thermische Solaranlagen sowie die Direktbefeuerung. Da Wärme weniger Arbeitsfähigkeit besitzt als elektrischer Strom, kommt es hier zu niedrigeren Leistungszahlen.

Ab- und Adsorptionskältemaschinen beruhen auf dem Effekt der Siedetemperaturerhöhung eines Kältemittels durch einen Sorbenten. Der elektrische Verdichter einer Kompressionskältemaschine wird durch einen thermischen Verdichter ersetzt. Das Kältemittel wird dort aus dem Verdampfer kommend sorbiert und dann unter Wärmezufuhr auf einem höheren Druckniveau wieder deskribiert. Der deskribierte Sorbent kann anschließend wieder zur Sorption und damit zur Kälteerzeugung genutzt werden. Der restliche Prozess entspricht dem einer Kompressionskältemaschine. Tab. 1-3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren zur Erzeugung von Kälte.

Tab. 1-3 Verfahren zur Kälteerzeugung

Elektrisch angetriebene Kältemaschinen	
Kompressionskältemaschinen	Kompressionskältemaschinen bestehen in ihrer einfachsten Ausführung aus vier Elementen: zwei Wärmeübertragern (Verdampfer und Kondensator), einem Verdichter und einem Expansionsventil. Ein dampfförmiges Kältemittel wird vom Verdichter komprimiert, anschließend unter Wärmeabgabe im Kondensator abgekühlt und verflüssigt. Nach dem Durchströmen eines Expansionsventils gelangt das Kältemittel in den Verdampfer, wo es unter Wärmeaufnahme (Kälteerzeugung) verdampft.
Thermische Kälteverfahren	
Flüssigsorption (Absorption)	Das effizienteste Arbeitspaar ist Wasser/Lithiumbromid (eigentlich Wasser/wässrige Lithiumbromidlösung). Erstgenanntes ist das Kältemittel, Zweitgenanntes der Sorbent. Durch den Einsatz von Wasser als Kältemittel ist die Anwendung auf den Einsatz von Temperaturen bis um 0 °C beschränkt. Diese Anwendung eignet sich also nur zur Klimakälteerzeugung. Als weiteres Stoffpaar hat sich Ammoniak/Wasser etabliert. Hier können Temperaturen weit unter 0 °C erreicht werden, dafür müssen aber höhere Antriebstemperaturen und eine niedrigere Leistungszahl in Kauf genommen werden.
Feststoffsorption (Adsorption, Absorption)	Feststoffsorptionskältemaschinen sind noch nicht so etabliert wie Flüssigsorptionskältemaschinen. Da hier noch kein geeignetes Verfahren zur Wärmerückgewinnung beim Wechsel von Desorption und Sorption gefunden wurde, werden hier im Allgemeinen ebenfalls schlechtere Leistungszahlen erreicht als bei Wasser/Lithiumbromid. Hier wird noch viel im Bereich der Materialsuche geforscht. Zum Einsatz kommt bisher Wasser/Silikagel und Wasser/Zeolith zur Erzeugung von Klimakälte und Ammoniak/Aktivkohle bzw. Methanol/Aktivkohle mit dem Potenzial zur Prozesskälte.

Quelle: Eigene Darstellung

1.4 Systemintegration

Mit zunehmendem Anteil regenerativen Stromes im Gesamtenergiesystem nimmt auch die Bedeutung der Wärmepumpentechnologie zu. Einerseits verbessert sich ih-

re Effizienz und Umweltbilanz für das Gesamtsystem mit zunehmendem Anteil an Strom aus Erneuerbaren Quellen, andererseits nimmt auch ihre Bedeutung als Element zur Sektorenkopplung und zur Erbringung von Systemdienstleistungen zu.

Aktuell ist noch nicht genau abzusehen, inwieweit Aufgaben der Systemdienstleistungen auf stark dezentrale, kleinere Systeme im Endanwenderbereich oder auf zentralere Großsysteme im eher industriellen Bereich verteilt werden. Die vorhandenen wissenschaftlichen Studien kommen hier zu unterschiedlichen Ergebnissen, was zum Teil an den getroffenen Randbedingungen und am gewählten Modellierungsansatz liegt (IWES 2015; Quaschnig 2013).

Aufgrund der technologischen Unterschiede hinsichtlich erzielbarer Leistungszahlen, spezifischer Investitionskosten, aber auch der maximalen Temperaturniveaus haben beide Varianten ihre Berechtigung und versprechen relevante Anwendungsfelder zu finden.

Derzeit dominiert eindeutig der Anwendungsfall der kleinen, dezentralen Systeme. Diese werden jedoch gemäß der heute geltenden Randbedingungen mit nur kleinen oder gar keinen Pufferspeichern installiert, da sie im Normalfall ihre Betriebszeiten nicht am Strommarkt orientieren. Könnte man die Speicher noch nachrüsten, so stellt die gewählte Leistung für den Fall einer späteren Orientierung der Betriebsweise am Strommarkt eine nur schwer zu überwindende Hürde dar, weil sie zur Abnahme von Stromspitzen nicht ausreichend ist. Somit stellen Wärmepumpensysteme, die heute unter solchen Randbedingungen installiert werden, eine künftig nur schwer integrierbare Residuallast dar.

Große Wärmepumpen steuern derzeit einen deutlich geringeren Anteil bei. Sie sind aber aufgrund höherer erzielbarer Temperaturen eine interessante Option im industriellen Bereich. Ihr deutlich geringerer spezifischer Investitionsbedarf und ihre höhere Mindestleistung machen sie vor allem im Wärmenetz und Quartiersbereich interessant, wo sie auch in Kombination mit KWK betrieben werden können.

Für beide Varianten gilt aber gleichermaßen, dass ein wesentliches Element einer künftigen Nutzung eine sinnvolle Systemintegration ist. Nur hiermit kann der erwünschte systemdienliche Effekt gleichwohl im Wärme- wie auch im Stromsektor erzielt werden.

Ein wichtiger Treiber im aktuellen Marktumfeld ist die Kopplung von PV-Batteriesystemen mit Wärmepumpen. In diesen Konzepten werden die Wärmepumpen als teilweise steuerbare Last eingesetzt, um die unter aktuellen energiewirtschaftlichen Bedingungen optimale Erlösstruktur zu erreichen und einen möglichst hohen Anteil an lokal erzeugtem Strom direkt zu verbrauchen. Neben diesen wirtschaftlichen Anreizen besteht durch diese dezentralen Technologien zukünftig ein guter Ansatz, um Netzschwachpunkte im Verteilnetz zu bewirtschaften.

2 Stand F&E in Deutschland

2.1 Entwicklungs- und Forschungsschwerpunkte

Die Forschung und Entwicklung von Technologien des Themenfeldes wurde in Deutschland in den letzten vierzig Jahren relativ umfangreich durchgeführt. Als Indikator hierfür wurden die öffentlich verausgabten Mittel des Bundes in Tab. 2-1 dargestellt. Die Auswertung beruht auf einer Stichwortsuche in der EnArgus-Datenbank, eine Doppelzählung kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Tab. 2-1 Öffentliche F&E-Projekte in Deutschland für Umweltenergienutzung von 1970-2019

		Anzahl Projekte	
		1970-2010	2010-2019
Erschließung Umweltquellen	Oberflächennahe Geothermie	5	10
	Erdsonden	15	1
	Kalte Fernwärme	6	3
	Abwärme	12	70
Energie-wandler	Wärmepumpen	152	126
	Sorptionswärmepumpen	27	7
	Kältemaschinen	19	39
Systeme	Low-Ex	39	811

Quelle: EnArgus

2.2 Erschließung von Umweltwärme

Die Forschung und Entwicklung zur Erschließung von Außenluft für die thermische Nutzung durch Außenlufteinheiten erfolgt in der Regel im Kontext der Forschung zu Kältemaschinen oder Wärmepumpen. Einzelne F&E-Vorhaben adressierten die hydraulische Effizienz, die vor allem im Rahmen von wissenschaftlich begleiteten Demonstrationsvorhaben analysiert wurde.

Die oberflächennahe Geothermie und das Vorhaben Erdsonden waren Gegenstand in einigen F&E-Vorhaben, vor allem in den Jahren 1990 bis 2000, als diese Technologie umfangreich in den Markt eingeführt wurde. Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Methoden zur Effizienzbestimmung, der Potenzialermittlung sowie auf der Effizienzevaluierung durch Monitoring.

Die Erschließung von Abwärme als Umweltenergiequelle ist ein Schwerpunkt der F&E-Tätigkeiten im Technologiefeld Umweltwärme seit vielen Jahren mit einem signifikanten Anstieg in den letzten Jahren.

2.3 Wärmepumpen und Kältemaschinen

Für die öffentlich geförderte Forschung an Wärmepumpen und Kältemaschinen wurden in den letzten vierzig Jahren in rund 340 Vorhaben etwa 170 Mio. Euro investiert. Der Schwerpunkt lag dabei im Wesentlichen auf den Zeiträumen zwischen 1970 und 1990 sowie ab 2009 mit einem Volumen von rund 90 Mio. EUR. Der Anteil der wissenschaftlichen Arbeiten zu thermisch angetriebenen Prozessen liegt zwischen 5 und 10 %.

Schwerpunkte der Forschung lagen in der Steigerung der energetischen Performance der Geräte durch Verbesserung der Einzelkomponenten, dem Einsatz neuer Kältemittel und Stoffpaare. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Entwicklung und Bewertung hybrider Systeme, wie z. B. der Kombination von Solarthermie und Umweltenergie zu solaren Wärmepumpen.

2.4 Systemintegration, Qualitätssicherung und Low-Ex-Systeme

Die Forschung zur Systemintegration von Umweltwärmesystemen war ein Schwerpunkt der öffentlichen Förderung der letzten Jahre. Aufgrund des systemischen Ansatzes ist nur ein Teil der in Tab. 2-1 aufgeführten Vorhaben dem Technologiefeld Umweltwärme zuzuordnen, ein wichtiger Teil auch den gebäudebezogenen Technologien. Durch die – vom Umfang der bewerteten Anlagen und Systeme weltweit größten – Demonstrations- und Feldtestvorhaben in den letzten zehn Jahren wurden zum einen die kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologien zur Nutzung der Umweltwärme, insbesondere der Wärmepumpen stimuliert und dokumentiert. Zum anderen wurde weiterer F&E-Bedarf zur Qualitätssicherung bei der Systemintegration aufgezeigt.

Aufgrund der umfangreichen Demonstrationsvorhaben stehen sehr detaillierte Analysen zur Energieeffizienz der hydraulischen Erschließung der einzelnen Umweltquellen zur Verfügung. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Entwicklung und Bewertung von Niedertemperaturübergabesystemen und ihrer Regelung als „Enabler“ für die Nutzung von Umweltwärme. Bei den thermisch angetriebenen Wärmepumpen und Kältemaschinen wurde vor allem an Methoden zur Reduktion der systembedingt etwas höheren Aufwände für Hilfsenergie gearbeitet.

Ein weiterer Schwerpunkt aktueller Vorhaben ist die Erforschung der Systemkompatibilität unter sich ändernden energiewirtschaftlichen Randbedingungen und Stromnetzen.

3 Relevanz öffentlicher Förderung

3.1 Kriterium 1: Vorlaufzeiten

Die Grundtechnologien sind zum größten Teil seit vielen Jahren bekannt und im Markt eingeführt. Weiterentwicklungen, die z. B. durch den Einsatz neuer Wärmeträgermedien oder Kältemittel notwendig werden, können aber durchaus noch Vorlaufzeiten von 5 bis 10 Jahren verursachen, da durch den Einsatz unter stark veränderten Druckbedingungen neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren eingesetzt werden müssen.

Das Kriterium Vorlaufzeit wird hier auf die Technologien zur Nutzung von Umweltwärme angewandt, die noch nicht marktverfügbar sind. Aufgrund der sehr unscharfen Detaillierung gibt Tab. 3-1 nur Anhaltswerte.

Tab. 3-1 Vorlaufzeiten bis zur Kommerzialisierung von Technologien im Technologiefeld Umweltenergie

Abhängig von den verschiedenen Szenarienentwicklungen und öffentlicher Förderung ist mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Anlage in Deutschland zu rechnen										
Erschließung Umweltenergie: Oberflächennahe Geothermie, kalte Fernwärme										
Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030	<input type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030	<input type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Kompressionswärmepumpen und Kältemaschinen										
Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030	<input type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030	<input type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Thermische angetriebene Wärmepumpen und Kältemaschinen										
Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020	<input type="checkbox"/>	bis 2030	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020	<input type="checkbox"/>	bis 2030	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Systemintegration										
Szenarienbereich DE_80 %	bis 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030	<input type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>
Szenarienbereich DE_95 %	bis 2020	<input checked="" type="checkbox"/>	bis 2030	<input type="checkbox"/>	bis 2040	<input type="checkbox"/>	bis 2050	<input type="checkbox"/>	nach 2050	<input type="checkbox"/>

Quelle: Eigene Darstellung

Da es für alle Technologien des Technologiefeldes bereits erste kommerzielle Anwendungen gibt – wenn auch nicht mit der notwendigen techno-ökonomischen Performance, wie sie in den Szenarien hinterlegt ist und welche mittels F&E erreicht werden soll – ergibt sich eine sehr geringe Abhängigkeit von Szenarien. Lediglich für die auf Sorptionstechnologien beruhenden thermisch angetriebenen Verfahren ist eine Pfadabhängigkeit vorhanden, die sich in unterschiedlicher Investitionsbereitschaft in F&E auswirken kann.

3.2 Kriterium 2: Forschungs- und Entwicklungsrisiken (technisch, wirtschaftlich, rohstoffseitig)

Teilkriterium 2.1 Entwicklungsstadium

Tab. 3-2 gibt eine Übersicht zum aktuellen Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Umweltwärme mit den vier wichtigsten Technologien:

Tab. 3-2 Aktuelles Entwicklungsstadium des Technologiefeldes Umweltwärme

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung	TF	T1	T2	T3	T4
Grundlagenforschung						
	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technologieentwicklung		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Demonstration		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Kommerzialisierung						
	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Systemeinsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

TRL = Technology Readiness Level; TF = Technologiefeld

T1 = Erschließung von Umweltwärme, oberflächennahe Geothermie, T2 = Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen, T3 = Sorptionswärmepumpen und -kältemaschinen, T4 = Systemintegration

In allen Technologien gibt es eine große Bandbreite des Entwicklungsstandes und durchgängig bereits kommerzielle Anwendungen, die oben stehende Tabelle kann daher auch auf Ebene der Technologien nur einen Anhaltspunkt darstellen.

Die Erschließung von Umweltwärme durch Erdsonden oder durch Außenlufteinheiten ist Stand der Technik, auch kalte Fernwärme ist bereits in kommerziellen Vorhaben umgesetzt worden. Entwicklungsschwerpunkt ist daher die Verbesserung der techno-ökonomischen Performance.

Im Bereich der Kompressionswärmepumpen werden neue Komponenten entwickelt, die mit höheren Temperaturniveaus und damit häufig einhergehend höheren Druckniveaus arbeiten können, der Stand der Entwicklung ist hier TRL 4-8.

Bei der Entwicklung neuer Stoffpaare, neuer Komponenten wie Wärmeüberträger und neuer Systemkonzepte wie mehrstufige Anlagen im Bereich der Sorptionstechnologie ist das Entwicklungsstadium etwas geringer als bei den Kompressionssystemen und liegt zwischen den TRL 3 und 6.

Im Kontext der Systemintegration ist zwischen der technischen Integration auf Ebene der Gebäudetechnik, Industrieprozesse oder Wärme- und Kältenetze auf der einen Seite und der energiewirtschaftlichen und digitalen Integration auf der anderen Seite zu unterscheiden. Bei beiden Themen liegt der TRL zwischen 5 und 8.

Teilkriterium 2.2 Technisches und wirtschaftliches F&E-Risiko

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über das technische und wirtschaftliche Entwicklungsrisiko des Technologiefeldes Umweltwärme; die einzelnen Technologien werden im Folgenden differenziert bewertet.

Erschließung von Umweltwärme (T1)

Die Forschung und Entwicklung von Systemen zur Erschließung oberflächennaher Geothermie birgt insbesondere wirtschaftliche Risiken, da diese im Vergleich zu Luftsystemen mit höheren Kosten verbunden sind.

Die Nutzung von Abwärme ist technologisch insofern mit Risiken verbunden, als nicht für alle Quellen geeignete Wärmetauschersysteme zur Verfügung stehen. Das wirtschaftliche Risiko besteht vor allem in der teilweise mangelnden Planbarkeit der Verfügbarkeit dieser Quellen aufgrund veränderter Nutzungs- oder Produktionsprozesse.

Tab. 3-3 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologieerschließung Umweltwärme

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen (T2)

Technologische Herausforderungen sind der Übergang zu natürlichen Kältemitteln sowie die Einbindung in Heizsysteme und Kühlsysteme im Bestand. Die Energieeffizienz hängt in hohem Maße von den im System erreichbaren Temperaturen ab.

Wirtschaftlich besteht ein Risiko, das sich aus der Abhängigkeit von dem Verhältnis Strom- zu Gaspreis und aus der im Vergleich zu fossilen Brennern aufwändigeren Systemintegration ergibt. Die direkte Kopplung zum Stromsystem bietet zum anderen neue Chancen durch neue Erlöse durch Lastmanagement.

Tab. 3-4 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologie Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sorptionswärmepumpen und -kältemaschinen (T3)

Das technische Risiko thermisch angetriebener Wärmepumpen und thermischer Kälteerzeugung besteht in der Erreichbarkeit der angestrebten Jahresarbeitszahlen sowie in der Einbindung in Heiz- und Kühlsysteme im Bestand. Die Energieeffizienz hängt in hohem Maße von den im System erreichbaren Temperaturen ab.

Das wirtschaftliche Risiko ist bei der Kälteerzeugung sehr hoch, da die Systeme aufwändiger sind als Wettbewerbstechnologien. Das wirtschaftliche Risiko der thermisch angetriebenen Wärmepumpen besteht darin, dass sie auf der einen Seite technologisch nicht so weit entwickelt sind wie die Kompressionswärmepumpen, auf der anderen Seite systemisch vor allem eine hoch effiziente fossile Effizienztechnologie darstellen und damit pfadabhängig sind.

Tab. 3-5 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologie Sorptionssysteme

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Systemintegration und LowEx-Systeme (T4)

Systeme zum Heizen und Kühlen mit Umweltenergie sind schon heute in vielen, insbesondere in kleinen Wohngebäuden und Gebäuden mit Büronutzung konkurrenzfähig gegenüber fossilen Heiz-, Kühl- und Lüftungstechniken. Die Herausforderungen liegen in größeren Wohngebäuden aufgrund der Anforderungen an die Trinkwasserhygiene sowie in der Sicherung der Installationsqualität. Technische und ökonomische Risiken bestehen auch bei der Entwicklung und Einführung neuer digitaler Planungs- und Installationsverfahren (Stichwort BIM, Bauwerksinformationsmodelle).

Eine weitere techno-ökonomische Herausforderung liegt in der Systemkompatibilität in Zeiten mit geringem Angebot an Strom aus erneuerbaren Energien. Dazu gehören insbesondere Fragen zur Dimensionierung von Wärmepumpensystemen sowie die Integration von Speichern zur Erbringung von Systemdienstleistungen. Die Systemintegration von Wärmepumpen in bestehende (Hochtemperatur-) Wärmenetze und (Low-Ex-) Wärmenetze in Bestandsquartieren stellt eine techno-ökonomische Herausforderung dar.

Tab. 3-6 Bewertung technischer und wirtschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsrisiken in Zusammenhang mit Technologie Systemintegration

	sehr gering	gering	eher gering	eher hoch	hoch	sehr hoch
Das <i>technische</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das <i>wirtschaftliche</i> Forschungs- und Entwicklungsrisiko ist ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4 Detaillierte Bewertung des Technologiefeldes

4.1 Kriterium 3: Marktpotenziale

Die Potenziale zur Nutzung von Umweltwärme bei einem annähernd konstanten Bestand an zu versorgenden Gebäuden und Industrien werden zum einen durch den Wettbewerb mit anderen Wärme- und Kälteversorgungstechnologien bestimmt, zum anderen durch den sich kontinuierlich reduzierenden Wärmebedarf der Gebäude.

Weiterhin eröffnet sich durch den zunehmenden Bedarf an steuerbaren Lasten in einem gekoppelten Strom-Wärme-System ein Marktpotenzial, welches sich durch derzeit vorhandene Marktmechanismen noch nicht erschließt.

Die prognostizierten Anteile der einzelnen neuen Versorgungstechnologien für Wärme hängen wesentlich von den jeweiligen realisierten Kostensenkungspotenzialen sowie von deren Systemkompatibilität ab. Für die Deckung des Kältebedarfs stellt Umweltenergie die einzige Senke dar, um Kälte bereitzustellen. Das Potenzial ist daher nur abhängig von der Entwicklung des Kältebedarfs und der Effizienz der Wandlungstechnologie.

Teilkriterium 3.1 Globales Marktpotenzial

Das *globale* Marktpotenzial für Wärme aus Kompressionswärmepumpen wird in Tab. 4-1 dargestellt. Es basiert auf Studien der IEA (2016b) und Energy Revolution (Greenpeace International 2015). Die Szenarien der IEA zeigen in allen Fällen einen moderaten Zuwachs des Anteils der Wärmepumpen steigend auf rund 20 % – unabhängig von den angestrebten Zielen hinsichtlich der Begrenzung des weltweiten Anstiegs der Temperatur. Bei einer stärkeren Begrenzung des Anstieges der Temperaturen kommen vermehrt Effizienzmaßnahmen in Gebäuden zum Tragen, entsprechend sinkt das Marktpotenzial etwas. Das Marktpotenzial steigt von 6 GW/a bis 2020 bis auf 13-21 GW/a in der letzten betrachteten Dekade. Das entspricht einem Volumen von 14 Mrd. EUR/a bis 2020 auf 7-11 Mrd. EUR/a in 2050. Die Studie Energy Revolution geht in ihren ambitionierten Szenarien von einem deutlich schnelleren Anstieg des Anteils der Wärmepumpen aus, hier beträgt das maximale Marktpotenzial im Zeitraum 2030-2040 115 Mrd. EUR/a.

Das Potenzial für oberflächennahe Geothermie wird nicht separat ausgewiesen, da es in den Szenarien nicht abgebildet wird. Der Anteil der geothermischen Wärmepumpen in Europa liegt derzeit bei rund 10 %, Tendenz leicht fallend. Skaliert man diesen Anteil, ergibt sich ein Potenzial von aktuell 6 GW bis 21 GW. Dies entspricht in heutigen Preisen 3,9 Mrd. EUR (2020) - 13,7 Mrd. EUR (2050).

Tab. 4-1 Bandbreite des globalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionswärmepumpen (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
Einheit	GW/TWh		GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	85/140	120/180	85/140	230/410	85/140	230/410
2030	140/220	160/250	145/230	960/1.760	130/200	960/1.760
2040	200/320	220/340	190/310	2.000/3.690	155/250	2.050/3.780
2050	280/450	300/460	250/400	2.750/5.010	185/300	2.900/5.200

Quelle: Greenpeace (2015); IEA (2016b); eigene Berechnungen

Tab. 4-2 Analyse des globalen Marktpotenzials für die Technologie Wärmepumpen (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
Einheit	GW/TWh		GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2013-2020	57/95	78/115	57/95	190/345	57/95	190/345
2020-2030	110/170	120/190	120/185	880/1.620	100/150	880/1620
2030-2040	155/250	170/260	140/230	1.680/3.100	110/180	1.730/3.200
2040-2050	210/340	230/350	190/300	2.080/3.780	130/220	2.220/3.950

Quelle: Greenpeace (2015); IEA (2016b); eigene Berechnungen

In den IEA Energy Technology Perspectives 2016 wird ausgehend von einem globalen Kältebedarf von 4700 TWh/a ein starker Anstieg bei einem BAU-Szenario auf 12.500 TWh/a erwartet, ein mittlerer Anstieg bei einem 4 °C-Szenario (auf 9.500 TWh/a) und ein moderat steigender in einem 2 °C-Szenario (auf 6.000 TWh/a) (IEA 2016b). Der Anteil der Umweltwärme daran beträgt 50-70 %. Das Marktpotenzial steigt von 380 GW/a bis 2020 auf 450-1.020 GW/a in der letzten betrachteten Dekade. Das entspricht einem Volumen von 80 Mrd. EUR/a bis 2020 und gleichbleibend bzw. ansteigend auf 60-120 Mrd. EUR/a in 2050.

Tab. 4-3 Bandbreite des internationalen globalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionskältemaschinen (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
Einheit	GW/TWh		GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	6.460/5.810		6.280/5.660		5.660/5.100	
2030	8.580/7.730		7.530/6.780		5.970/5.370	
2040	11.100/10.000		9.050/8.150		6.520/5.870	
2050	13.900/12.500		10.600/9.510		6.720/6.040	

Quelle: IEA (2016b); eigene Berechnung

Tab. 4-4 Analyse des globalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionskälte (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich INT_2 °C		Szenarienbereich INT_besser_2 °C	
Einheit	GW/TWh		GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2013-2020	3.840/3.460		3.670/3.300		3.050/2.740	
2020-2030	6.430/5.790		5.440/4.890		4.080/3.670	
2030-2040	8.260/7.430		6.540/5.890		4.530/4.080	
2040-2050	10.200/9.150		7.550/6.800		4.540/4.080	

Quelle: IEA (2016b), eigene Berechnungen

Der Anteil der nicht-elektrischen Energieträger an der Kälteerzeugung beträgt im Jahr 2013 3 % und steigt je nach Szenario auf 4 % (BAU) oder 11 % (<2 °C Erwärmung) (IEA 2016b). Das globale Marktpotenzial für die thermisch angetriebenen Kältemaschinen ist damit stark pfadabhängig und beträgt rund 5 % des Potenzials der elektrischen Kältemaschinen.

Teilkriterium 3.2 Nationales Marktpotenzial

In Tab. 4-5 ist das nationale Marktpotenzial für die Umweltwärme dargestellt, das in der Regel durch Wärmepumpen erschlossen wird. Für die Ermittlung des Marktpotenzials wurden im Wesentlichen die Szenarien von ISI und Ökoinstitut sowie Prognosen herangezogen, da hier eine konsistente Datenlage für verschiedene Szenariowel-

ten (BAU, 80 % und 95 %) für alle Referenzjahre vorlag. Für das Jahr 2050 wurden zusätzlich die Szenarien von Fraunhofer IWES und Fraunhofer ISE berücksichtigt. Es zeigt sich eine sehr hohe Varianz in den Ergebnissen, wobei Minima und Maxima jeweils relativ konsistent sind. Das Absinken des Potenzials im Jahre 2050 rührt im Wesentlichen von den unterschiedlichen Annahmen bzw. Ergebnissen in Bezug auf den Rückgang des Heizwärmebedarfs des Gebäudebestandes her.

Tab. 4-5 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionswärmepumpe (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
Einheit	GW/TWh		GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2020	7,6/12	12,4/20	11,5/18	20/32	26/42	26/42
2030	11,5/18	28/44	22/35	50/80	64/103	64/103
2040	13,5/22	51/82	28/44	83/133	95/151	95/151
2050	14,1/23	70/112	29/47	107/171	101/162	139/222

Tab. 4-6 Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionswärmepumpe (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)

Jahr	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
Einheit	GW/TWh		GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
2013-2020	6,6/11,9	11,4/18,3	11/17	9/30	25/40	25/40
2020-2030	8,9/16	23,4/38	18,2/29	43/69	56/89	56/89
2030-2040	9,7/17,5	42/68	20,3/32	66/106	73/117	73/117
2040-2050	9,5/17,2	53/85	20,1/32	79/127	70/111	107/172

Quelle: Greenpeace (2015); IEA (2016b); eigene Berechnungen

In den 95 %-Szenarien sind die absoluten Werte der mit Kältemaschinen umgesetzten Energie sowie die installierte Leistung geringer als im Szenarienbereich 80 %, da der Kältebedarf aufgrund baulicher Maßnahmen wie Sonnenschutz dort geringer ausfällt.

Tab. 4-7 Bandbreite des nationalen Technologieeinsatzes für die Technologie Kompressionskältemaschine (absolute Werte aller installierten Anlagen im jeweiligen Stichjahr)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max
2020		41/90		40/87
2030		52/110		49/103
2040		64/130		58/120
2050		75/150		67/135

Tab. 4-8 Analyse des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionskälte (Summe neu installierte Leistung je Dekade einschl. Ersatzinstallation)

Jahr	Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	GW/TWh		GW/TWh	
	Min	Max	Min	Max
2015-2020		17/37		16/34
2020-2030		39/79		36/74
2030-2040		46/90		42/85
2040-2050		54/100		48/96

Das Marktpotenzial, das weltweit mit Wärmepumpen umgesetzt wird, variiert je nach Szenario bei der angenommenen Kostensenkung von derzeit 1.100 EUR/kW auf 200 EUR/kW zwischen 60 Mrd. EUR und 580 Mrd. EUR. Für die Technologie Kompressionskälte liegt das Potenzial bei 120-190 Mrd. EUR, bei höherer Steigerung der Energieeffizienz steigt das Potenzial leicht.

Tab. 4-9 Hochrechnung des internationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionswärme und -kälte (Kosten neu installierte Leistung im Bezugsjahr einschl. Ersatzinstallation in Preisen 2015)

Jahr	Wärme				Kälte		
	Mrd. EUR/GW	Ref	Mrd. EUR		Mrd. EUR/GW	Mrd. EUR	
			E[R]	Adv. E[R]		ETP 4DS	ETP 2DS
2020	1,1	126	242	242	0,141	133	120
2030	0,9	139	834	834	0,135	153	121
2040	0,7	151	1.369	1.407	0,129	175	126
2050	0,5	150	1.379	1.440	0,20	190	121

Tab. 4-10 Hochrechnung des nationalen Marktpotenzials für die Technologie Kompressionswärmepumpe (Kosten neu installierte Leistung im Bezugsjahr einschl. Ersatzinstallation in Preisen 2015)

Einheit	Referenz (BAU)		Szenarienbereich DE_80 %		Szenarienbereich DE_95 %	
	Mrd. EUR		Mrd. EUR		Mrd. EUR	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Jahr						
2020	5,3	9,1	8,4	15,2	20,0	20,0
2030	5,3	14,0	10,9	26,0	33,3	33,3
2040	3,9	16,9	8,1	26,5	29,2	29,2
2050	1,9	10,6	4,0	15,9	13,9	21,5

Das Marktpotenzial, das national mit Wärmepumpen umgesetzt wird, variiert je nach Szenario bei der angenommenen Kostensenkung von derzeit 1.100 EUR/kW auf 200 EUR/kW zwischen 4 Mrd. EUR und 21 Mrd. EUR.

Verifizierung mittels Analyse der implizierten Wachstumsraten

Die zu erwartenden Wachstumsraten sind in den internationalen Märkten höher, liegen aber auch im deutschen Kontext über den mittleren Wachstumsraten des BIP. Die Wachstumsraten sind in Bezug auf notwendige Kapazitäten gut realisierbar. Gegebenenfalls ergibt sich aus den Wachstumsraten die Notwendigkeit zur Intensivierung der Ausbildung im Handwerk. Die internationalen Wachstumsraten sind etwas höher als die nationalen.

Tab. 4-11 Wachstumsraten der Technologie Wärmepumpe der unterschiedlichen globalen und nationalen Szenarien als CAGR dargestellt

	CAGR(t,t')
CAGR(2020,2050) _{INT_Bau}	3,1 - 4,0 %
CAGR(2020,2050) _{INT_2 °C}	3,6 - 8,7 %
CAGR(2020,2050) _{INT_besser_2 °C}	2,6 - 8,8 %
CAGR(2020,2050) _{DE_Bau}	4,9 %
CAGR(2008,2050) _{DE_80 %}	3,2 - 5,8 %
CAGR(2008,2050) _{DE_95 %}	4,6 - 5,7 %

Im Bereich der Kälteerzeugung mittels Kompressionskältemaschinen sind die Wachstumsraten trotz im Vergleich zur Wärmeerzeugung stärker steigendem Kältebedarf etwas niedriger, da hier keine Substitution von Technologien wie im Wärmebereich durch die Substitution von fossil befeuerten Kesseln erfolgt.

Tab. 4-12 Wachstumsraten der Technologie Kompressionskälte der unterschiedlichen globalen und nationalen Szenarien als CAGR dargestellt

	CAGR(t,t')
CAGR(2013,2050) _{INT_Bau}	2,7 %
CAGR(2013,2050) _{INT_2 °C}	1,9 %
CAGR(2013,2050) _{INT_besser_2 °C}	0,7 %
CAGR(2020,2050) _{DE_80 %}	2,2 %
CAGR(2020,2050) _{DE_95 %}	1,8 %

4.2 Kriterium 4: Beitrag zu Klimazielen und weiteren Emissionszielen

Teilkriterium 4.1 Vermiedene Treibhausgas-Emissionen

Die internationalen Potenziale zur Reduktion von Treibhausgasen durch die betrachteten Technologien zur Nutzung von Umweltwärme lassen sich aufgrund der öffentlich zugänglichen Datenlage für die betrachteten Szenarien nur qualitativ bzw. überschlägig bestimmen. Ein wesentlicher Beitrag ist die Reduktion des spezifischen CO₂-Ausstoßes pro erzeugter kWh Strom von 528 (2013) auf unter 40 g CO₂/kWh (2050) im 2 °C-Szenario. Die in Tab. 4-13 dargestellten Werte sind für die konservativen internationalen Szenarien der IEA (2016b) im Vergleich zu den nationalen Szenarien und denen in der Studie von Greenpeace (2015) relativ gering.

Tab. 4-13 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen weltweit im Vergleich zum Referenzfall 6 °C bzw. zum 2 °C-Szenario.

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich Int 2 °*	Szenarienbereich Int <2 °**
2020	1,5	28
2030	10	238
2040	20,3	594
2050	33,4	899

Quelle: *IEA (2016b); **Greenpeace (2015); eigene Berechnung

Die nationalen Potenziale werden durch einen Vergleich zu einem Szenario ermittelt und bewertet, in dem keine Steigerung des Anteils der Wärmeversorgung mit Wärmepumpen, sondern die Heizung durch fossil befeuerte Kessel mit jeweils 50 % Anteil Erdöl- und Erdgaskessel erfolgt. Grundlage sind die 80 %- und 95 %-Szenarien von Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015).

Tab. 4-14 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung von Umweltwärme durch Kompressionswärmepumpen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	4,5	7,1
2030	17,1	27,5
2040	37,4	46,9
2050	55,1	55,3

Quelle: Öko und ISI (2015); eigene Berechnung

In den Szenarienwelten der 80 %-Reduktion ist der Beitrag zur Reduktion zunächst geringer, da weniger fossile Kessel durch Wärmepumpen ersetzt werden und die Dekarbonisierung des Strommixes geringer ist als bei den 95 %-Szenarien. In anderen Szenariowelten, z. B. denen des Fraunhofer IWES und des Fraunhofer ISI, ist der Beitrag zur Reduktion der Treibhausgase noch größer.

Die Treibhausgasemissionen aufgrund von Kälteerzeugung durch elektrisch angetriebene Kompressionsmaschinen hängen proportional vom Wachstum des Kältebedarfs und von dem Wandel der Stromerzeugung ab. Die globalen Treibhausgasemissionen werden mit rund 700 Mio. t CO₂-Äquivalenten in 2010 angegeben, davon rund 75 % bedingt durch die indirekten Emissionen bei der Erzeugung des Stromes, rund 25 % infolge der Emissionen durch fluoridierte Kohlenwasserstoffe (DOE 2016).

Tab. 4-15 Jährlich vermiedene Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung von Umweltwärme mittels Kältemaschinen weltweit im Vergleich zum Referenzfall 6 °C-Szenario (nur Einsparungen durch Änderung des Strom-Mixes).

Mio. t CO ₂ -äq./a	Szenarienbereich Int 4 °	Szenarienbereich Int 2 °
2020	71	181
2030	261	487
2040	459	748
2050	660	960

Quelle: IEA (2016b); Greenpeace (2015); eigene Berechnung

In den international und national zur Verfügung stehenden Szenarien werden die durch Sorptionstechnologien zur Wärme- und Kältebereitstellung verursachten Treibhausgasemissionen und deren Minderungspotenziale nur zum Teil ausgewiesen. Sie hängen entscheidend von der Art der Wärmebereitstellung (Abwärme aus industriellen Prozessen, Solarwärme, fossile Verbrennung, Biomassenutzung) und der Wahl der Referenztechnologie ab, die durch deren Einsatz substituiert wird. Aufgrund der Aggregation in den Szenaren lassen sich daher keine quantitativen Aussagen zum Treibhauspotenzial treffen.

Teilkriterium 4.2 Vermiedene oder gestiegene andere Emissionen

Die für die Kompressionswärmepumpen und Kältemaschinen eingesetzten Kältemittel basierend auf fluorierten Kohlenwasserstoffen haben ein hohes Global Warming Potenzial (GWP). Die in den Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen eingesetzten fluorierten Kohlenwasserstoffe als Kältemittel sind derzeit mit rund 10 Mio. t CO₂-äq pro Jahr für rund zwei Drittel der FKW-bedingten Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Durch den Umstieg auf Kältemittel mit einem geringen Global Warming Potenzial kann sowohl der absolute Ausstoß der F-Gase als auch der relative Anteil an den unter die F-Gas-Verordnung fallenden Gase deutlich reduziert werden, siehe Tab. 4-16.

Tab. 4-16 Fluorierte Kohlenwasserstoffe, die jährlich durch F&E und Umstellung auf andere Kältemittel in der Technologie Kompressionswärmepumpen und Kältemaschinen vermieden werden

Name des Schadstoffs: FKW			
	Mio. t/a	Anteil in %	Minderung gegenüber 2010 in %
2010	10,14	67	-
2020	4,66	47	54
2030	0,29	25	97
2040	0,114	9	99
2050	0,028	2	100

Quelle: UBA (2014)

Eine zentrale Aufgabe der Forschung und Entwicklung der Kompressionswärmepumpen und Kompressionskältemaschinentechnologien ist die Entwicklung und Anpassung der bestehenden Technologien auf neue Kältemittel. Auch diese sind aufgrund ihrer Toxizität oder Brennbarkeit hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen zu beurteilen. Eine weitere Alternative sind Mischungen aus sehr schwach fluorierten Kältemitteln mit einem sehr geringen GWP, die sich aber aufgrund der hohen Preise noch nicht durchsetzen. Eine wichtige Randbedingung und Treiber für die Einführung von natürlichen und low-GWP-Kältemitteln ist die F-Gase-Verordnung von 2014 und die Kigali-Ergänzungen zum UN Montreal-Protokoll für F-Gase 2016 (MON 2016). Tab. 4-17 zeigt mögliche Ersatzstoffe auf.

Tab. 4-17 Einsatz kritischer Rohstoffe im Technologiefeld Umweltwärme

Kritischer Rohstoff	Substitutions-möglichkeit	Rezyklierbarkeit
FKW	Propan, Butan, Ammoniak, CO ₂	hoch

4.3 Kriterium 5: Beitrag zur Energie- und Ressourceneffizienz

Die vier beschriebenen Technologien Kompressionswärmepumpe und –kältemaschine, Sorptionssysteme und oberflächennahe Geothermie sind zentrale Technologien zur Transformation des Energiesystems im Wärme- und Kältebereich.

Durch den Wechsel des Energieträgers und durch den hohen Anteil an erneuerbarer Umweltwärme wird in beiden nationalen Szenarien zum Einsatz von Kompressionswärmepumpen rund 550 PJ nicht-erneuerbare Primärenergie durch den Einsatz von Wärmepumpen eingespart. Der Beitrag zur Energieeffizienz wird wie in Kriterium 4 beschrieben durch einen Vergleich zu einem Szenario ermittelt und bewertet, in dem keine Steigerung des Anteils der Wärmeversorgung mit Wärmepumpen erfolgt, sondern die Heizung durch fossil befeuerte Kessel mit jeweils 50 % Anteil Erdöl- und Erdgaskessel erfolgt. Grundlage sind die 80 %- und 95 %-Szenarien von Öko-Institut

und Fraunhofer ISI (2015). Der nicht-erneuerbare Anteil der Primärenergie für Gas wird hierbei mit 1.1 angesetzt, für Strom entsprechend den AMS 80 %- und 95 % - Szenarien aus Fraunhofer ISE (2015) sowie Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015).

Tab. 4-18 Jährlich vermiedener Primärenergieeinsatz (nicht-erneuerbarer Anteil) durch Einsatz von Wärmepumpen in Deutschland im Vergleich zur Referenz fossile Kessel

PJ/a	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
2020	43	66
2030	192	275
2040	404	511
2050	540	579

Anmerkung: Es wird der vermiedene Primärenergieeinsatz im Bezugsjahr dargestellt, nicht der kumulierte vermiedene Primärenergieeinsatz bis zum Bezugsjahr.

4.4 Kriterium 6: Kosteneffizienz

Die derzeit den Markt dominierenden Wandlungstechnologien zur Nutzung von Umweltwärme sind zum Teil seit Jahrzehnten eingeführt und hinsichtlich ihrer Kosteneffizienz weitgehend optimiert. Durch den Einsatz einfacherer Technologien wie Splitgeräte sind Kostensenkungen zu erwarten, ggf. zu Lasten der Energieeffizienz.

Das Verhältnis der Preise für die wesentlichen Energieträger Gas und Strom hat entscheidenden Einfluss auf die zu erreichenden Marktanteile der jeweiligen Versorgungstechnologien. Insbesondere elektrische Wärmepumpen reagieren sehr sensitiv auf das Verhältnis der Kosten von Gas und Strom. Die damit verbundenen Preisrisiken sind entwicklungshemmend. Für die Technologie Kompressionswärmepumpen sind aufgrund der Wachstumsraten gegebenenfalls höhere Kostensenkungen aufgrund von Skalierung möglich. Sinken z. B. die Kosten von derzeit 1.100 EUR/kW auf 200 EUR/kW statt auf 400 EUR/kW bis 2050, ergeben sich Einsparpotenziale von 4-21 Mrd. EUR.

Tab. 4-19 Jährliche direkte und indirekte Kosteneinsparpotenziale durch Technologie Kompressionswärmepumpen in Deutschland im Vergleich zum Referenzfall (nicht abgezinst auf ein Basisjahr; für alle installierten Anlagen im Jahr)

Mrd. € _{2015/a}	Szenarienbereich DE_80 %	Szenarienbereich DE_95 %
	Min - Max	Min - Max
2020	0	0
2030	1,2 - 1,9	3,7
2040	2,7 - 8,8	9,7
2050	4,0 - 15,9	13,9 - 21,5

4.5 Kriterium 7: Inländische Wertschöpfung

Der Umsatz der Mitgliedsunternehmen des Bundesindustrieverbandes Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e. V. (BDH) betrug 2015 weltweit im Bereich des Wärmeversorgungsmarktes 13,6 Mrd. Euro. Bei einer jährlichen Erneuerung der Wärmeerzeugungsanlagen von 4 % werden in Deutschland 680.000 Einheiten pro Jahr umgesetzt (BDH 2017).

Wenn man von einem Marktanteil von 90 % der inländischen Hersteller am Wärmepumpenmarkt ausgeht, sind 2016 bei einem Gesamtmarkt von 66 Tsd. Heizwärmepumpen und 12 Tsd. Trinkwasserwärmepumpen rund 48.000 inländische Systeme pro Jahr installiert worden. Bei einer geschätzten mittleren Wertschöpfung von 12.000 EUR pro System betrug die Wertschöpfung der Systeme zur Nutzung von Umweltwärme rund 570 Millionen EUR/a.

Durch die hohen Anforderungen an die Energieeffizienz bei Heizwärmepumpen (siehe Anforderungen BAfA) sind inländische Produkte mit international vergleichbar hohen Jahresarbeitszahlen gut wettbewerbsfähig. Auch in traditionell überwiegend aus Ostasien bedienten Märkten wie den Splitgeräten gab es die Rückverlagerung von Produktionsarbeitsplätzen nach Deutschland.

Für die kommenden Jahre würde bei einer gleichbleibend hohen inländischen Wertschöpfung entsprechend des Marktpotenzials aus Tab. 4-9 die inländische Wertschöpfung durch Absatz von Geräten auf 3,8-20 Mrd. EUR ansteigen. Hinzu kommt eine inländische Wertschöpfung in ähnlicher Höhe für die Planung und Installation der Anlagen.

4.6 Kriterium 8: Stand und Trends von F&E im internationalen Vergleich

Teilkriterium 8.1 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie

Industrielle Forschung und Entwicklung für Wärmepumpentechnologien und Kältemaschinen sind insbesondere in Japan und den USA führend, insbesondere bei Kältemitteln und Verdichtern. In einzelnen, wichtigen Technologieaspekten, die sich aus den im Vergleich hohen Energieeffizienzanforderungen in Europa und insbesondere in Deutschland ergeben, sind deutsche Hersteller wettbewerbsfähig, was sich auch in entsprechenden nationalen und europäischen Marktanteilen ausdrückt. Dies

ist insbesondere die Systemkompetenz (Integration und Abstimmung von Komponenten, Regelung und Abstimmung mit dem Wärmeverteilsystem). In die eigenen Möglichkeiten zur Entwicklung neuer Geräte wurde von der deutschen Industrie in den letzten Jahren durch Aufbau neuer Entwicklungszentren erheblich investiert.

Tab. 4-20 Internationale Aufstellung der deutschen Industrie hinsichtlich des Technologiefeldes Umweltenergienutzung

Welchen Status hat die deutsche Industrie hinsichtlich Know-how innerhalb dieses Technologiefeldes weltweit?

Technologiefeld ☐ Technologieführerschaft ☒ wettbewerbsfähig
☐ nur in Einzelanwendungen konkurrenzfähig ☐ abgeschlagen

Teilkriterium 8.2 F&E-Budgets

Für die im Technologiefeld Umweltwärme wichtigste Unterkategorie „144 Heat Pump & Chillers“ weisen nur wenige Mitgliedstaaten der IEA Forschungs- und Entwicklungsmittel aus. Da deutsche Angaben für das Technologiefeld fehlen bzw. die Kategorien nicht benannt sind, in denen die Aufwendungen enthalten sind, wurde ersatzweise auf Analysen von Forschungsbudgets der Datenbank EnArgus zurückgegriffen. Tab. 4-21 gibt Volumina zu den jeweiligen Technologien in den Zeiträumen bis 2009 und Vorhaben an, die nach 2010 bewilligt wurden. Es wurde keine Preisbereinigung vorgenommen.

Die Kategorien Wärmepumpentechnologien und Kältemaschinen sowie Erschließung von Umweltwärmequellen sind durch die benannten Stichworte gut abgrenzbar, in den Ergebnissen für das Stichwort „Low-Ex-Systeme“ sind auch Vorhaben zur Effizienzsteigerung durch bessere Nutzung des Exergie-Anteils enthalten, die außerhalb des Technologiefeldes Umweltwärme liegen. Die Forschungsbudgets sind kontinuierlich gestiegen, im Vergleich zu dem Zeitraum vor 2010 gab es eine jährliche Steigerung von nominal 16 %. Der Anteil an den deutschen F&E-Ausgaben betrug 2014 1,8 % mit steigender Tendenz.

Tab. 4-21 Öffentliche F&E-Förderung in Deutschland für Umweltenergienutzung von 1970-2019

	Stichwort	Mio. EUR		Anzahl Projekte	
		1970-2009	2010-2019	1970-2009	2010-2019
Energie-wandler	Wärmepumpen	68	70	68	152
	Sorptionswärmepumpen	11,6	4,3	27	7
	Kältemaschinen	9,1	21,8	19	39
Erschließung Umwelt-quellen	Oberflächennahe Geothermie	1,6	10,7	5	10
	Erdsonden	10,8	0,2	15	1
	Kalte Fernwärme	2,5	0,5	6	3
	Abwärme	18,7	28,1	110	70
Systeme	Low-Ex	15	556	37	811

Quelle: EnArgus

Als Referenz für internationale F&E-Aufwendungen wurden die von der IEA veröffentlichten Daten für Japan verwendet. Die Budgets sind etwa das 4-fache der deutschen Aufwendungen und wurden in den letzten Jahren deutlich erhöht (von 45 Mio. EUR in 2011 auf 62 Mio. EUR in 2014). Der Anteil am F&E-Budget ist ebenfalls deutlich höher mit 2,8 %, trotz sinkenden F&E-Budgets für Energieforschung in Japan.

Tab. 4-22 Bewertung des Standes von Forschung und Entwicklung für das Technologiefeld Umweltenergie – Input-Orientierung

	Einheit	Wert
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld - Deutschland		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung der jeweiligen Technologie Status Quo (Jahresmittel 2010-2019, laufende Projekte)	Mio. €/a	16,5
Zeitlicher Trend (Veränderung Periode 2010/2019 gegenüber 1970/2010)	+ Mio. €/a	1,05
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	16
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mrd. €	861
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	%	1,9
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	16,1
Entwicklung des öffentlichen F&E-Budgets auf Bundesebene im jeweiligen Technologiefeld – Internationaler Vergleich		
F&E-Förderung der jeweiligen Technologie im Vergleich mit im Technologiefeld besonders aktivem Land Japan		
Japan		
Absolutangabe der öffentlichen F&E-Förderung Wärmepumpen und Kältemaschinen Status Quo (2014)	Mio. €	62
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ €/a	5,6
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	12,5
Gesamtes öffentliches Energie-F&E-Budget nach IEA Status Quo (2015)	Mrd. €	1820
Relativer Anteil am gesamten öffentlichen Energie-F&E-Budget nach IEA	%	2,8
Zeitlicher Trend (Veränderung über mindestens die letzten 5 Jahre)	+ %/a	16

4.7 Kriterium 9: Gesellschaftliche Akzeptanz

Die Nutzung von Umweltenergie erfährt grundsätzlich eine sehr hohe Akzeptanz. Kritisch ist die Akzeptanz der oberflächennahen Geothermie, wo aufgrund von unsachgemäßen Abteufungen in einzelnen Fällen erhebliche Schäden durch Hebungen des Untergrunds aufgetreten sind (Stuttgarter Nachrichten 2017). Ein weiteres Feld der Akzeptanz, das durch Forschung und Entwicklung adressiert werden sollte, sind die mit den Außenlufteinheiten von Wärmepumpen einhergehenden lokalen Schallemissionen (MDR 2017).

Tab. 4-23 Bewertungsraster für die Akzeptanz von Technologien zur Erschließung Umweltquellen

Technologien	Lokale Ebene	
	Lokale Akzeptanz	
	Lokale Konflikte, Klagen, Aktivitäten von Bürgerenergie	
	Bewertung	Begründung/ Quelle (Studien)
Oberflächennahe Geothermie	3	STA (2017)
Außenlufteinheiten	3	MDR (2017)
Bewertung mittels 5-stufiger Skala: Hohe Akzeptanz (1), eher hohe Akzeptanz (2), mittlere Akzeptanz (3), eher niedrige Akzeptanz (4), niedrige Akzeptanz (5)		

4.8 Kriterium 10: Unternehmerisch-technische Pfadabhängigkeit und Reaktionsfähigkeit

Die Verfügbarkeit von Erdgas und Strom hat einen großen Einfluss darauf, welche der Energieeffizienztechnologien zur Wärme- und Kälteversorgung sich durchsetzen werden. Je schneller Strom regenerativ und kostengünstig bereitgestellt werden kann (auch in Konkurrenz zum wachsenden Strombedarf im Bereich der Mobilität), desto höher wird der Anteil der elektrischen Wärmepumpen sein. Die Reaktionsfähigkeit ist aufgrund von typischen Standzeiten von 20 bis 25 Jahren zwar niedrig, aber höher als im Bereich der Bautechnik.

Tab. 4-24 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologie oberflächennahe Geothermie

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	3-15	3-15	3-12	3-12	3-12
Bauzeit	Monate	1	1	1	1	1
Heute übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	40	40	40	40	40
Spezifische Investition	€/2015/kW	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200

Tab. 4-25 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologie Kompressionswärmepumpen

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	3-15	3-15	3-12	3-12	3-12
Bauzeit	Monate	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3
Heute übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	15-20	15-20	15-20	15-20	15-20
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /Einheit	800	750	700	650	600

Tab. 4-26 Indikatoren zur Bewertung der Pfadabhängigkeit und Reaktionszeit der Technologie Sorptionswärmepumpen

Variable	Einheit	Heute	2020	2030	2040	2050
Planungszeit	Monate	3-15	3-15	3-12	3-12	3-12
Bauzeit	Monate	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3
Heute übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	15	15-20	20-25	20-25	20-25
Spezifische Investition	€ ₂₀₁₅ /Einheit	2.080	1.800	1.400	1.050	800

4.9 Kriterium 11: Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Verfügbarkeit von Erdgas und Strom hat einen großen Einfluss darauf, welche der Energieeffizienztechnologien zur Wärme- und Kälteversorgung sich durchsetzen werden. Infrastrukturen müssen nicht in nennenswertem Umfang neu geschaffen werden, ggf. sind die elektrischen Netze auszubauen. Sollen Wärmepumpen und Kältemaschinen verstärkt zu Systemdienstleistungen im Stromnetz genutzt werden, werden zusätzliche Speicher und über den Wärme- und Kälteleistungsbedarf der jeweiligen Gebäude hinaus gehende Leistungen benötigt. Für den Einsatz in Wärme- und Kältenetzen sind diese anzupassen bzw. auszubauen.

Tab. 4-27 Abhängigkeit von Infrastrukturen

Die Nutzung der Technologie(n) ist unabhängig von Infrastrukturen möglich	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein
Die Nutzung und Verbreitung der Technologie(n) ist von bestehenden Infrastrukturen abhängig	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen bestehende Infrastrukturen ausgebaut werden	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Zur Verbreitung und Nutzung der Technologie(n) müssen neue Infrastrukturen gebaut werden	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nein

4.10 Kriterium 12: Systemkompatibilität

Durch den steigenden Einsatz von Strom infolge von Technologien zur Erschließung von Umweltwärme steigt zunächst die Belastung der Netze – wenn auch nur in sehr kleinem Umfang. Die Versorgungssicherheit steigt jedoch langfristig durch den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung und die Reduktion der fossilen Anteile. Die im Rahmen der Studie analysierten vier Technologien sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Energieträger, ihrer unterschiedlichen Koppelung an das elektrische System und ihres unterschiedlichen tages- und jahreszeitlichen Einsatzes differenziert zu bewerten.

Systeme zur Erschließung der Umweltwärme unterscheiden sich durch ihre jahreszeitliche Verfügbarkeit. Geothermische Umweltquellen stehen ganzjährig mit relativ geringen Temperaturschwankungen zur Verfügung und wirken somit stärker systemstabilisierend als die Umweltquelle Umgebungsluft.

Die sorptiven Systeme zur Wärme- und Kälteerzeugung erlauben eine weitgehende Entkopplung vom elektrischen System und ermöglichen die Nutzung von erneuerbarer Wärme wie zum Beispiel die Solarthermie. Als fossil betriebene Effizienztechnologie sind Gassorptionswärmepumpen insbesondere in Regionen mit gut ausgebauten Gasnetzen – wie überwiegend in Deutschland eine mit der vorhandenen Infrastruktur gut kompatible Lösung.

Die Bereitstellung von Klimakälte mittels Kompressionskälte korreliert gut mit dem Dargebot aus photovoltaisch erzeugtem Strom. Da diese in der Regel auch mit sensiblen Kältespeichern kombiniert wird, ist dies ein Bereich, in dem mittels Sektorkopplung eine Lastverschiebung relativ leicht realisiert werden kann.

Die systemische Kompatibilität von Kompressionswärmepumpen wird durch zwei Eigenschaften geprägt. Zum einen entsteht die Notwendigkeit, bei Zubau von Wärmepumpen ausreichend Leistungsreserve vorzuhalten in Phasen mit geringem Windangebot und kalten Außenlufttemperaturen („Dunkelflaute“). Zum anderen ist es die effizienteste Möglichkeit, ein hohes Maß an erneuerbarer Energie auch im Wärmebereich einzusetzen. Aktuelle Studien zeigen verschiedene Lösungsansätze auf, die weiter zu entwickeln sind (IWS 2015; Palzer 2016; Energy Brain Pool 2017). Die Entwicklung von weiteren Lösungsansätzen für das erste Thema durch eine noch bessere Systemintegration ist daher einer der wichtigen F&E-Fragen dieses Themfeldes.

5 F&E-Empfehlungen für die öffentliche Hand

Aufgrund der zu erwartenden Marktentwicklung wird die Weiterentwicklung von Wärme- und Kälteversorgungssystemen im Bereich der Komponenten primär durch industrielle Forschung und Entwicklung erfolgen. Es gibt jedoch entscheidende Bereiche, bei denen eine öffentliche F&E-Förderung sinnvoll und notwendig ist, da hier entweder Grundlagenarbeiten notwendig sind oder aber Systemfragen berührt werden, die nicht von einzelnen Herstellern gelöst werden können. Zu fördern sind hier neue Technologien mit ökonomischem Risiko und vor allem Demonstrations- und Pilotvorhaben.

5.1 F&E-Empfehlung Erschließung Umweltquellen

■ Außenluft

- Entwicklung von Methoden zur Reduktion der Schallemission bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz
- Entwicklung von volumetrischen Wärmetauschergeometrien

■ Oberflächennahe Geothermie

Systeme der oberflächennahen Geothermie mit Erdwärmesonden und Wärmepumpen sollen noch effizienter und umweltsicherer werden. Nötig sind:

- Nachhaltige Untergrundnutzung
Negative Effekte bei Bau und Betrieb müssen durch Anwendung verlässlicher Erkundungs- und Beobachtungsmethoden sowie geeigneter Wärmemanagementkonzepte minimiert werden.
- Systemoptimierung Unter- und Übertage
Höhere Betriebssicherheit und insbesondere höhere Arbeitszahlen werden sowohl durch Verbesserung an den Erdwärmesonden als auch in der Verteilung von Wärme/Kälte in Gebäuden erreicht. Die Kombination regenerativer elektrischer und thermischer Energie mit Wärmepumpen und geothermischen Anlagen ermöglicht effiziente Wärmeversorgungssysteme, erfordert allerdings optimierte Komponenten und Regelungsstrategien.
- Entwicklung von Optimierungsverfahren zur optimalen Positionierung und Verteilung von an den entsprechenden Untergrund angepassten Sondenfeldern.
- Kostensenkung durch Verbesserung der Bohrverfahren: hier sind Technologien zu entwickeln, die schneller, kostengünstiger und speziell auf die Bedürfnisse der Geothermie abgestimmt sind. Gefragt sind u. a. Verfahren mit einem geringeren Energiebedarf für die Bohrtechnik und deren Hilfsaggregate sowie emissionsarme, d. h. schmierölfreie, Bohrwerkzeuge.
- Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden durch Verbesserung der Komplettierung und der verwendeten Materialien.
- Entwicklung alternativer Wärmeentzugsarbeitsmittel (CO₂) bzw. Weiterentwicklung der Direktverdampfungsverfahren (auf der Basis von nichtwassergefährdenden Arbeitsmedien).
- Entwicklung geeigneter, zeitlich-räumlich registrierender Monitoringwerkzeuge.

- Gebirgsoffene Mehr- und Einbohrlochanlagen mit und ohne Gebirgsstimulation zur Erhöhung der untertägigen Wärmetauscherfläche und zur Verbesserung der Volumenströme sowie Entwicklung von Instrumenten zur Quantifizierung der relevanten Wärmetransportprozesse (Numerisch, Tracer).
- Mitteltiefe Erdwärmesysteme zur Versorgung größerer (Bestands-) Objekte und Infrastrukturen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Großprojekte mit multiplen Abnehmern oftmals über viele Jahre entwickelt werden. Um die Wirtschaftlichkeit der Geothermie in Konkurrenz zu anderen Wärmeerzeugern gewährleisten zu können, müssen zur Reduktion der Erstinvestition „mitwachsende“ Erdwärmetauschersysteme entwickelt werden.

5.2 F&E-Empfehlung Kompressionswärmepumpen und -kältemaschinen

- Technologiespezifische Entwicklung von Komponenten zur Erhöhung des Gütegrades und damit der Effizienz, Optimierung der Wärmeübertrager und Einführung neuer Wärmeübertragungstechnologien (Microchannel-Technologie, Reduktion der luftseitigen Druckverluste durch elektrohydrodynamische Verfahren).
- Reduktion der Kältemittelmengen, um auch brennbare Kältemittel im Wärmepumpensystem kostengünstig einsetzen zu können.
- Entwicklung von geregelten und ungeregelten Ejektoren für Kältemittel mit hohem und mittlerem Druckniveau zur Minimierung der Exergie-Verluste bei der Drosselung
- Einführung und Entwicklung von Turbokompressoren kleiner Leistung für die Entwicklung von ölfrei betriebenen Kompressionswärmepumpen
- Schwerpunkte der Entwicklung bei den Kompressionswärmepumpen waren und sind die eingesetzten Kältemittel mit dem Ziel eines möglichst geringen GWP (Global Warming Potenzial). Die Komponenten der Wärmepumpe müssen an dadurch teilweise transkritische Prozesse angepasst werden.
- Optimierung von WP:
 - für einen hocheffizienten Winterbetrieb, d. h. einen hohen Temperaturhub bei niedrigen Quellentemperaturen
 - für hohe Senkentemperaturen (für Prozesswärme, Wärmespeicherung bei Stromüberschuss im Netz (Power-to-Heat), zentrale Trinkwarmwasserbereitung, Wärmenetze)
 - durch hohe Modulationsfähigkeit und die Fähigkeit zu schnellen und stabilen Lastwechseln, um ein schwankendes (PV-)Stromangebot besser zu nutzen
 - durch verlustarme Prozessführung im dynamischen Betrieb (geringe Zeitkonstanten, reduzierte Mindeststillstandzeiten, weiter Temperatur- und Durchflussbereich)
 - durch selbstlernende bzw. selbstoptimierende Prozessführung (z. B. zur Selbstkorrektur von Fehleinstellungen durch den Nutzer und Installateur)
 - für die Anwendung als dezentrale Trinkwarmwasserbereiter in Wohnungssituationen
 - für die Integration in Versorgungssituationen mit stark veränderlichen Temperatur-Spreizungen auf der Quellenseite (z. B. saisonale Wärmespeicherung)
 - für verringerte Schallemissionen speziell bei den Außenluft-WP

5.3 F&E-Empfehlung Sorptionswärmepumpen und -kältemaschinen

- Optimierung von der energetischen Performance
 - Steigerung der Leistungsdichte,
 - neue Wärmeübertragerkonzepte,
 - neue Materialpaare als Kältemittel,
 - Reduktion des Hilfsenergiebedarfs
 - Abstimmung und Regelung, auf Geräteebeane,
- Entwicklung neuer Systemkonzepte, mehrstufige Verfahren

5.4 F&E-Empfehlung Systemintegration

- Integration der WP in das übergeordnete Energiesystem
 - Ein zukünftiges Problem für das gesamte Energiesystem kann die sog. Thermosensibilität werden (wenn immer mehr Strom zur Wärmebereitstellung genutzt wird, steigt der Strombedarf bei sinkenden Temperaturen). Diesbezüglich besteht weiterer Forschungsbedarf, um für die Transformation des Stromsystems ein passendes „Überschussmanagement“ zu entwickeln.
 - Die gewünschte Flexibilisierung der WP-Laufzeit kann eine Verschlechterung der Effizienz der WP und/oder zusätzliche Investitionen zur Folge haben. Um damit verbundene Mehrkosten zu kompensieren, müssen entsprechende Geschäftsmodelle entwickelt werden.
 - Pooling
 - Leistungsüberhöhung
 - Wärmespeicher
- Entwicklung primärenergetisch optimierter Wärmeversorgungskonzepte für Quartiere auf Basis von WP:
 - Entwicklung netzdienlicher Betriebsstrategien (zentral und dezentral) von WP eines Quartiers: Anpassung an das regionale Dargebot von Wind- und Solarstrom durch Lastverschiebung und Minimierung von Spitzenlasten mittels Speichertechnologien (Strom und Wärme) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmequellen der WP
 - Umsetzung von WP-Quartieren in Demonstrationsvorhaben und wissenschaftliche Begleitung/Optimierung, Entwicklung allgemeingültiger Planungshilfen für WP-Quartiere (Bestand und Neubau)
 - Untersuchung von regenerativ versorgten Niedertemperaturwärmenetzen mit dezentralen (Klein-)WP
 - Kombinierte Wärme-Kältenetze
- Systemtechnische Forschung zur Integration von WP in das Gebäudewärmesystem:
 - optimierte Pufferspeicherbeladung für Heizung und/oder Warmwasser
 - Kopplung mit Sonnenwärme auf der Quellenseite zur Ermöglichung kleinerer Erdreichwärmequellen und zur Verhinderung von Langzeitauskühlung
 - Kopplung mit Sonnenwärme auf der Senkenseite zur Steigerung der Systemeffizienz

- Kopplung mit lokal erzeugtem Sonnenstrom und Batteriespeichern
- Entwicklung ganzheitlicher Systemregelalgorithmen unter Einbindung der Vorhersage von Bedarfs- und Angebotsprofil für die Kopplung mit Sonnenstrom und -wärme
- neue Anwendungen wie dezentrale kompakte Kleinst-WP für Wohnungsstationen oder Solar-WP-Module für Fassaden mit hybriden Strom-Wärme-kollektoren
- Hybrid-WP als Übergangslösung, besonders für den Gebäudebestand

Literaturverzeichnis

- BDEW (2015): Primärenergiefaktoren. Der Zusammenhang von Primärenergie und Endenergie in der energetischen Bewertung. Grundlagenpapier. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
[https://www.bdew.de/internet.nsf/id/06FBC70ECF24F3A7C1257E51003DA425/\\$file/705_2015-04-22_Grundlagenpapier-Primaerenergiefaktoren.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/06FBC70ECF24F3A7C1257E51003DA425/$file/705_2015-04-22_Grundlagenpapier-Primaerenergiefaktoren.pdf).
Letzter Zugriff: 11.01.2017.
- BDH (2016): Portrait BDH 2016. Köln: Bundesverband Deutscher Heizungsindustrie. http://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Daten_Fakten/BDH-Portrait_2016_DE.pdf.
- BWP (2015): BWP-Branchenstudie 2015 - Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. Berlin: Bundesverband Wärmepumpen.
- DOE (2016): The Future of Air Conditioning for Buildings. Washington DC: Department of Energy.
- EnArgus (2017): Zentrales Informationssystem Energieforschungsförderung.
<https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2>. Letzter Zugriff: 04.05.2017.
- Ferrari (2015): Compressor technology outlook in the HP market- A tiered approach. Vortrag Heat Pump Summit, 20.10. 2015.
- Fraunhofer ISE (2013): Energiesystem Deutschland 2050 – Sektor- und energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien. Freiburg.
- Fraunhofer IWES (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr: Technologie-durchdringung Wärmemarkt im Basisszenario 2050. Kassel: Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme.
- Greenpeace International; Global Wind Energy Council; SolarPowerEurope (2015): Energy [R]evolution - A sustainable World Energy Outlook 2015.
<http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2015/>. Letzter Zugriff: 07.01.2017.
- Hessenschau (2016): Merkel eröffnet Viessmann-Forschungszentrum. Pressebericht Hessischer Rundfunk. <http://hessenschau.de/wirtschaft/merkel-eroeffnet-viessmann-forschungszentrum,merkel-bei-viessmann-100.html>. Letzter Zugriff: 04.05.2017.
- IEA (2016a): World Energy Outlook 2016. Paris: International Energy Agency.
- IEA (2016b): Energy Technology Perspectives 2016. Paris: International Energy Agency.
- IER (S. Wolf et al.) (2014): Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland. Abschlussbericht IER Universität Stuttgart.

- MDR (2017): Wärmepumpen - Spürbarer Lärm. MDR Radio Beitrag vom 10.04.2017 05:00 Uhr. <http://www.mdr.de/nachrichten/ratgeber/laerm-durch-waermepumpen-100.html>. Letzter Zugriff: 23.07.2017.
- Montreal Protocol (2016): Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Ozone Secretariat United Nations Environment Programme 2016 (Hrsg.). <http://ozone.unep.org/en/treaties-and-decisions/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer>. Letzter Zugriff: 23.07.2017.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, Karlsruhe.
- Palzer, A. (2016): Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Prognos; EWI; GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Projekt Nr. 57/12. Basel, Köln, Osnabrück.
- Quaschnig, V. (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende. Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin 06/2016.
- STA (2017): SWR Landesschau Baden-Württemberg: „Missglückte Geothermie-Bohrung Staufen im 10. Jahr nach der Bohrkatastrophe“, 3:33 min | 25.1. | 18.45 Uhr | SWR Fernsehen BW. <http://avdlswr-a.akamaihd.net/swr/swr-fernsehen/landesschau-bw/aktuell-5/913960.sm.mp4>
- Stuttgarter Nachrichten (2017): Die Geothermie-Katastrophe in Staufen - Eine Stadt in Bewegung. Stuttgarter Nachrichten vom 25.04.2017. <http://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.die-geothermie-katastrophe-in-staufen-eine-stadt-in-bewegung.53fbc005-474f-49bc-a276-d119f2926d57.html>. Letzter Zugriff: 23.07.2017.
- UBA (2014b): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Vaillant (2016): Der Grundstein ist gelegt. Pressemitteilung Vaillant Group. https://www.vaillant-group.com/news-centre/pressemitteilungen/grundsteinlegungfezentrum-854484.de_de.html. Letzter Zugriff: 04.05.2017.